地面参照框架形成的连续表面整合加工假说*

董波 [1] 王成瑜 [2] 张秀玲 [2] 张天阳 [3]

([1] 苏州科技大学心理学系/城市发展智库，苏州 215009)

([2] 东北师范大学心理学院，长春 130024)

([3] 苏州大学医学部公共卫生学院，苏州 215123)

摘　要 地面参照框架是空间知觉的重要基础，连续表面整合加工(SSIP)假说首次对其形成过程做出了推测。SSIP 假说的核心观点及其相关证据包括地面的表征原理、整合条件和表征结果三个方面。虽然得到了大量研究的支持，但 SSIP 假说已有的支持性证据尚存在方法学上的不足、对心理机制关注较少，且已存在一些反对性证据，使其无法彻底厘清地面参照框架的表征过程。未来研究需结合基于过程检验的技术手段，直接探查地面参照框架的形成机制，并可考虑其在国防上的应用。

关键词 地面参照框架；地面表征; SSIP 假说；空间知觉

分类号 B842

1 引言

动物需要通过了解周围的空间布局信息(如空间大小、物体大小、物体与观察者的距离、物体间距等)，以完成寻找食物、避开掠食者、找寻路径等日常活动。依靠视觉来获取上述空间布局信息的过程被称为视空间知觉(visual space perception)或空间知觉(space perception) (Sedgwick, 2005; Proffitt, 2006; Eckart & Markus, 2016; Hecht, Ramdohr, & Von, 2018)。空间知觉不仅包括对空间中一个或者几个客体(或目标物)的表征，还包括对客体所处的背景中的一系列表面(surface)的表征(Gibson, 1950; Sedgwick, 2005; Hajnal, Bunch, & Kelty-Stephen, 2014)。个体首先需要通过知觉上述表面构建空间背景表征，进而以此为参照框架编码客体的布局信息(Gibson, 1950; Philbeck & Loomis, 1997; Šikl & Šimeček, 2015; Zhou, Deng, Ooi, &

收稿日期：2019-07-28

* 国家自然科学基金项目(31100730, 31800907)；江苏省自然科学基金资助(BK20190936, BK20160316)；教育部社科研究青年基金项目(20YJC190002)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(2412018ZD018)；江苏高校哲学社会科学研究项目(2019SJA1267)。

* 董波和王成瑜同为第一作者。

* 通讯作者：张秀玲 journeyonstars@126.com；张天阳 tyzhang@suda.edu.cn。

He, 2016; Baldwin, Burleigh, Pepperell, & Ruta, 2016)。

地面是人类周围环境中最重要的一个表面。大量研究表明，在中等距离范围内(约 2 米以外 30 米以内)，人类是以地面为参照框架对置于其表面上的物体的空间布局进行编码的(He et al., 2004; Feria, Braunstein, & Andersen, 2003; He & Ooi, 2000; Bian, Braunstein, & Andersen, 2005, 2006; Ooi & He, 2006; Thompson & Creem-Regehr, 2007; Bian & Andersen, 2010; Kavšek & Granrud, 2013; Loomis, 2014; Wu, Zhou, Shi, He, & Ooi, 2015; Nakashima & Kumada, 2017; Loyola & Mauricio, 2018)。虽然研究者已经基本确定了地面参照框架的重要性，但是“地面参照框架的形成机制(即地面参照框架是如何形成、表征或被构建起来的？)”这一问题尚未得到充分揭示。He 及其同事(2004)提出的连续表面整合加工假说(sequential-surface- integration- process hypothesis, SSIP 假说)首次解释了地面参照框架的形成过程(He et al., 2004)，且得到了大量实证研究的支持(Ooi, Wu, & He, 2006; Jansen, Toet, & Werkhoven, 2011; Bian & Andersen, 2011; 周佩灵，黎安娟, 2011; Wu, He, & Ooi, 2014; Erkelens & Casper, 2015; Jenkins, Gross, Bisantz, & Nagi, 2015; Norman et al., 2015; Proulx, Todorov, Amanda, & De, 2016)。文章将从地面的表征原理、整合条件和表征结果三方面阐述 SSIP 假说的观点及相关证据，并对该假说的局限性进行分析，以期为地面参照框架的未来研究方向提供一些思路，促进该领域的发展。

2 连续表面整合加工假说的观点

SSIP 假说认为，在中等距离范围内的空间知觉中，人类首先利用近处的深度线索形成近处地面的表征，随后以此为锚点或模板，通过连续的纹理梯度信息逐步把远处的地面整合进来，最终形成一个远方向上翘起的地面参照框架(He et al., 2004)。该假说包含三个主要观点：第一，视觉系统是由近及远地表征整个地面，近处地面占据着重要的模板地位；第二，远方地面被成功整合的条件是地面的连续性；第三，视觉系统最终整合形成的是一个远方向上翘起的表面。

2.1 地面的表征原理——由近及远的表征顺序

Gibson(1950)的大地理论(ground theory)指出，“地面包含了空间知觉(尤其是物我距离知觉)所需的大部分信息”(Gibson, 1950; Murphy, Ban, & Welchman, 2013)。在承认地面对物我距离知觉极为重要的前提下，SSIP 假说阐述了视觉系统如何在中等距离范围内建构起地面表征。该假说认为，在线索足够且光照良好的环境条件下，视觉系统首先运用双眼线索(双眼视

差、双眼辐合、运动视差等)编码个体周围 2~3 米范围内的地面，形成近处地面的表征模板。当目标物处于 2~3 米范围之外时，视觉系统则通过单眼线索(如纹理梯度)，以近地面表征为基础把远处的地面整合进来。近处刺激在视网膜上被编码得更加精细，可以直接向视觉系统提供深度线索(如双眼视差和阴影)，使得近处地面的表征更加精确。相比之下，远处物体的体积过小、较为模糊，视觉系统无法通过直接的深度线索对其空间布局进行表征，只能以近地面为模板“推知”远处空间信息。人类的日常活动主要集中在中等距离范围以内，这一范围内的精细空间表征能力有利于个体的生存，因此 SSIP 假说的表征原理符合进化规律。回顾以往研究可以发现，由近及远的表征顺序已被三方面的研究证实(Wu, Ooi, & He, 2004; Wu, He, & Ooi, 2008; Creem-Regehr, Willemsen, Gooch, & Thompson, 2005)。

首先，物我距离判断是测量空间知觉的常用方式†(Wu, He, & Ooi, 2007, 2008; Ooi, Wu, & He, 2006; Zhou, He, & Ooi, 2013; Zhou, Ooi, & He, 2016; 焦军, 2011; 周柳, 2015)。若个体在空间知觉的过程中的确是由近及远的表征顺序，那么干扰原有的知觉顺序则会降低空间知觉的准确性。据此，研究者在自然场景中，通过分别测量被试从远处地面看向近处地面或由近处地面看向远处地面两种观看顺序条件下的物我距离判断能力，发现由近及远观察时的距离判断更加准确(Wu, Ooi, & He, 2004)。具体来看，无论目标物置于 4 米、5 米、6 米，还是 7 米处，由近及远观看时被试知觉到的距离与目标物的真实距离无显著差异；但由远及近观看时，被试对 5 米、6 米、7 米处目标物的知觉距离显著低于目标物真实距离，也显著低于由近及远观看时的知觉距离。这一结果直接说明了地面参照框架的形成由近处开始，然后逐步整合至远处。

其次，在验证近地面“模板地位”时，研究者在 2.5 米和 9.5 米处放置了一个长度为 44 厘米的参照物，并在 5 米、6 米、7 米处通过一个长度可调的目标物测量被试知觉到的参照物的长度。结果发现，当参照物在近处时，被试知觉到的更加准确。在每种条件下，目标物和被试之间的距离是恒定的，仅参照物的位置发生了变化。当把参照物放在近处时，被试匹配得更准；当把参照物置于远处时，匹配的精确度变差。研究者认为，当仅以远地面信息为模板而没有近处地面作为参考时，视觉系统无法由近及远连续地加工整个地表，对空间的表征变得不准确(Wu, He, & Ooi, 2008)。

最后，由 SSIP 假说中对表征顺序的假设可以推知，如果近地面不能被表征，则个体的距离知觉将会变差。Wu, Ooi 和 He(2004)利用眼罩限制被试的视野区域，让其仅能看到注视点

†空间知觉的研究范式还包括物物距离判断和方位判断。因为 SSIP 假说聚焦于以自我为中心的空间背景的表征过程，所以文章主要讨论物我距离判断下的相关研究。

周围 38.6°×39.5°、21.2°×21.2°、13.9°×13.5°范围内的空间，看不到脚下的近处地面。结果发现，当被试的视野范围被限制在 21.2°×21.2°与 13.9°×13.5°内时(即视觉空间被限制在一个很小的范围时)，个体无法由近及远连续知觉整个地表，其距离判断能力下降(Wu, Ooi, & He, 2004)。

2.2 地面的整合条件——相邻地面的连续性

SSIP 假说认为，在地面参照框架形成的过程中，连续均匀的地面是远处地面被成功整合进近处模板的前提条件。只有当近处地面与远处地面的纹理相同且二者表面连续时，地面整合才能成功，否则个体对远地面上物体的距离知觉将变得不准确。如图 1 所示，仅当 S_1 与 S_2 的纹理类型相同，且纹理梯度连续时，S_2 才能够以 S_1 为模板精确地“推知”其空间信息。研究者通过不完整地面和改变纹理梯度两种方式研究证明了连续均匀地面在空间知觉中的重要作用，进一步验证了 SSIP 假说的观点(He et al., 2004) 。

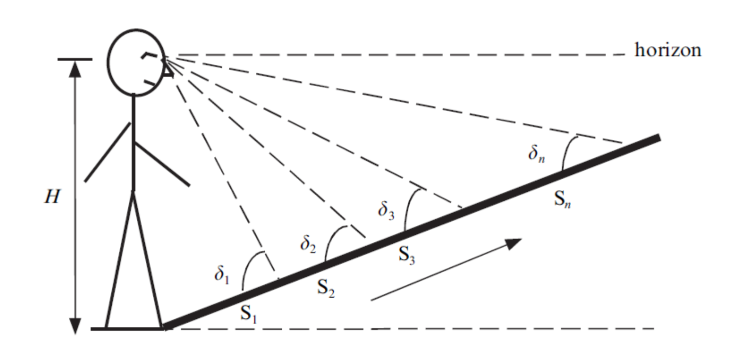


图 1 地面参考框架表征原理示意图。假设局部近地面为 S_1，当 S_2 位于站立点 2~3 米之外时，近处深度线索作用变小，视觉系统将利用纹理梯度由近及远逐步“推知”S_2、S_3……S_n 等远地面的空间布局。(引自 He et al., 2004)

研究者通过在地面上放置凸起遮挡物或设置凹下去的缺口来破坏地面的连续性，并支持了连续表面整合的观点。当目标物和被试之间的地面上存在凹坑(0.5 米深×1.3 米宽或 2.0 米深×4.1 米宽)时，被试会明显高估凹坑远处的目标物与自身间的距离，即便目标物在凹坑内，这种高估的趋势同样十分明显(Sinai, Ooi, & He, 1998; Yang & Purves, 2003)。当均匀连续地面上放置凸起的遮挡物时，个体会低估自身与目标物之间的距离，不能准确知觉呈现在遮挡物后的目标物(Yang & Purves, 2003; He et al., 2004; Wu, He, & Ooi, 2007; 焦军, 2011)。SSIP 假说认为，凸起或凹坑打乱了地面上的连续纹理，致使视觉系统无法形成准确的地面参照框架，最终干扰其距离知觉。为了验证凹坑和凸起的确是通过影响地面的连续性进而影响空间知觉，研究者采用三角行为范式引导被试在观察目标物的过程中让其视线绕过遮挡物，以消除凸起对连续地面的干扰(He et al., 2004)。研究者认为，从外侧绕过这些凹坑和凸起分离了

凹坑(凸起)与地面连续性两个因素，使得整合路径上地面是连续的。依据 SSIP 假说，因为三角行为范式确保了地面的连续性，所以实验中被试的空间知觉不会受到影响。实验结果也的确与 SSIP 假说的预期相一致：当视线绕过遮挡物时，被试可以对目标物的距离进行准确地判断(He et al., 2004)。

除了上述方式，研究者还通过构建远近纹理不同的地面，检验纹理梯度连续性对空间知觉的影响。例如, Sinai 等(1998)在被试与目标物之间设置了水泥和草地两种纹理(Sinai, Ooi, & He, 1998), Wu 等(2007)通过虚拟现实(virtual reality, VR)技术将被试与目标物之间的地面设置为草地与鹅卵石两种纹理。上述两个研究均发现，相较于一种纹理(仅为草地或鹅卵石)，被试在两种纹理条件下低估了自身与目标物之间的距离(Wu, He, & Ooi, 2007)。Wu 等(2007)还通过虚拟棋盘的纹理研究证明，相较于均匀纹理，跨越纹理梯度目标物的距离会被低估，并且视觉系统将跨越纹理梯度的远处地面知觉为向上翘起的表面(Wu, He, & Ooi, 2007)。Feria 等(2003)则采用操纵“对侧杆与后杆的距离”和“前杆与后杆的距离”进行匹配的方式，验证了纹理梯度骤变对距离知觉的影响(Feria, Braunstein, & Andersen, 2003)。在测验任务方面，研究者同时采用盲走任务和知觉匹配任务范式验证了上述结论。

2.3 地面的表征结果——远方向上翘起的表面

在连续表面的基础上，个体由近及远地将地面整合起来，形成较为准确的地面参照框架。然而，即便在毫无遮挡或凹坑的连续地面上，远处目标物的距离仍旧会被低估，距离越远低估的程度越高，最终形成一个远方向上翘起的平面(Ooi & He, 2007; Higashiyama & Yamazaki, 2015)。在知觉目标物位置时，视觉系统并没有认为物体处于水平面上，而是处于眼睛与目标物连线和一个向上翘起表面的交点上，这个向上翘起的斜面便是视觉系统内部存在的固有偏差(intrinsic bias) (Ooi & He, 2015)。固有偏差和外部线索共同影响着阳光充足时的地面参照框架，在二者的共同作用下，视觉系统将地面知觉为一个向上倾斜的表面，而非水平面。

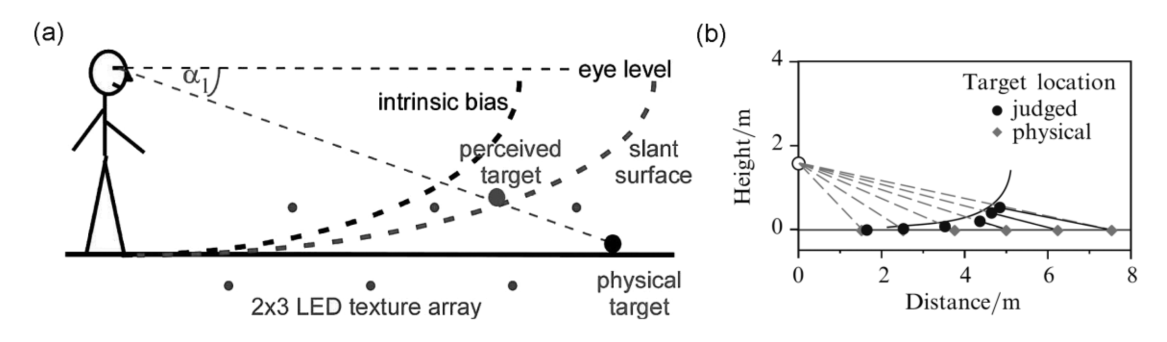


图 2 固有偏差示意图。(a) 图表示在线索微弱的条件下，被试把目标物定位在实际地面和固有偏差中间的

一个倾斜表面上(引自 Zhou, He, & Ooi, 2013)。(b) 图表示在黑暗环境中，被试同样把置于地面上的目标物(灰色)知觉在一个远处向上翘起的表面(黑色实线)上(引自 Ooi, Wu, & He, 2006)。

在光照充足的条件下，固有偏差与这些外部线索共同决定最终倾斜表面的曲率(Ooi, Wu, & He, 2001; Zhou, He, & Ooi, 2013)。由于光照充足条件下场景中的深度线索清晰可见，无法测得被试的固有偏差，所以研究者只能在线索较少或完全黑暗的条件下测量固有偏差。结果发现，当被试在黑暗中或者微弱灯光的环境中观察目标物时，目标位置越远，距离低估越明显，且会高估目标的高度，最终构成一个远方向上翘起的表面(如图 2 所示) (Zhou, Ooi, & He, 2016)。Zhou 等(2013)通过盲走-比划高度任务对黑暗中的发光客体进行了位置与大小的知觉研究，结果发现视觉系统把黑暗条件下客体的位置是知觉在向上倾斜翘起的内部曲面上(Zhou, He, & Ooi, 2013); 与此相同, Ooi、Wu 与 He 在 2006 年的研究中通过上述相同范式得到了同样的结果，并且通过对知觉的“L”形目标物的长度(可调整)与宽度(固定值)进行匹配，计算出向上倾斜的固有偏差角度大约为 12.4°~14.4°(由于实验范式的关系可能会存在差异)(Ooi, Wu, & He, 2006)。

3 连续表面整合加工假说的局限性分析

SSIP 假说在大地理论的基础上，进一步阐述了地面参照框架的形成过程，且已得到大量研究证据的支持。但是 SSIP 假说的已有支持性证据存在方法学上的不足，难以直接检验地面参照框架的形成过程，且有部分研究结果与 SSIP 假说的观点并不一致，故其正确性还有待进一步检验。另外，目前 SSIP 假说略显宏观，对心理机制关注不足。

3.1 已有支持性证据存在方法学上的不足

在证明 SSIP 假说的过程中，研究者并未直接观察表征过程是否如 SSIP 假说所言，而是预先假定某种操作(如限制视觉区、观看顺序、遮挡、凹坑、纹理扰乱等)可以干扰地面参照框架的某个知觉过程(如由近及远的整合顺序、近地面的精确表征、表面纹理连续等)，随后通过观察该操作是否真的导致空间知觉变差，来证明“某个知觉过程”是否存在。这种证明逻辑忽略了两个问题: 研究者假定的知觉过程是否存在? 上述操控方式是否通过研究者假定的知觉过程(而非其他过程)干扰了被试的空间知觉? 已有研究的确能够证明“近处地面很重要”“由近及远比由远及近观看效果更好”，但这些结论是否能够推至“先精确表征近处地面，然后由近及远逐步整合”则有待讨论。“近处地面重要”也许能暗示但不等于“优先表征近处地面”“由近及远比由远及近观看效果更好”也不一定意味着“人们在实际生活中的确是依照由

近及远的顺序表征地面”。

内省法(如口头报告)是检验心理过程的一种常用方式，可以弥补大部分行为研究“难以探查过程”的不足，但却难以检验 SSIP 假说。除了行为结果的测量之外，大部分心理现象的产生过程可以通过内省法报告出来，这些内省过程是后续行为实验的重要前提。如，被试可以体验到空间方位判断中自己所经历的三角定位、心理旋转、表象比较和转换等知觉过程(周荣刚，张侃, 2008)。然而在 SSIP 假说相关证据所采用的物我距离研究中，虽然研究者能够通过行走、跑、拉绳、指向等视觉引导的运动来判断被试的知觉结果是否准确(Eby & Loomis, 1987; Loomis et al., 1996; Teng & Charles, 2016; Thomson, 1983; Loomis, 2014; Kunz, Wouters, Smith, Thompson, & Creem-Regehr, 2009)，但却难以通过口头的方式报告出知觉结果，更难以内省出达成这一知觉结果的过程(Blake & Sekuler, 2006; Proffitt, 2006)。例如，我们可以轻松地拿起面前桌子上的杯子，但却很难准确说出杯子距离我们多远，更难以内省出我们如何知觉到这段距离。SSIP 假说是对知觉过程(而非知觉结果)的解释，但其支持性研究的行为结果无法得到内省法的佐证，导致其难以证明地面参照框架的表征(知觉)过程的确如 SSIP 假说所预期。需要指出的是，支持性证据的方法学问题并不否定 SSIP 假说本身和其深远的意义，只是我们需要用更加直接的方式去证明该假说。例如，利用诸如便携式眼动追踪、脑电监测和近红外光谱脑成像技术等可直接观测知觉过程的技术手段，检验 SSIP 假说的观点，深入探究和揭示地面参照框架的形成机制。

3.2 尚存在反对性证据

有研究表明人类观看地表的顺序并非由近及远。Gajewski 等(2014a)通过眼动追踪技术，直接考察被试在经典的盲走任务中的注视情况，结果发现，被试在知觉目标物距离的过程中并未表现出明显的由近及远的观看规律(Gajewski, Wallin, & Philbeck, 2014a)。被试在 74%的试次中首次注视了靶子区域，而仅有 4%的试次首次注视了靶子和观察者之间的近处区域。近处区域首次被注视的概率不仅低于靶子区域，甚至低于靶子远方的区域(21%)。研究者依据被试的眼动策略把所有试次分为稳定注视试次(被试直接看向靶子，并持续观看靶子至这个试次结束)、靶子-近处试次(被试直接看向靶子或近处区域，并且注视点在这两个区域之间来回切换)、远方-周围试次(被试直接看向靶子的远方或者周围墙壁，并且在这两个区域切换)。结果表明，三种策略分别占比 36%、31%和 33%。由此可见，靶子-近处地面试次在自然观看模式中没有显著优势，这与 SSIP 假说的预期并不一致，故由近及远的表征顺序尚须进一步验证。值得注意的是，该实验中的靶子-近处试次同时包括了由靶子看向脚下和由脚下看向靶子，如果仅从中筛选出如 SSIP 假说所言的由脚下看向靶子的试次，则比例会更低。

也有研究表明近处地面的重要性低于周围墙壁和天花板。Gajewski 等认为 Wu, Ooi 和 He(2004)利用眼罩限制被试的视野区域导致距离知觉变差这一实验结果并不存在问题，但该操作同时干扰了下视野的地面、周围视野的墙壁和上视野的天空，实验结果是否真的通过影响下视野的近地面(而非墙壁和天空)干扰距离知觉则不得而知。Gajewski 等(2014a)将实验条件分离为两种情况：仅遮挡近处地面(限制下方视觉区)，同时遮挡近处地面、周围墙壁和天花板(限制周围视觉区)，结果发现同时遮挡近处地面、周围墙壁和天花板会导致被试的距离判断严重下降，而仅遮挡近处地面仅发生了中等程度损伤(Gajewski, Wallin, & Philbeck, 2014a)。上述结果与 SSIP 假说不一致，故近处地面的模板地位也需进一步研究。

虽然上述结果不支持 SSIP 假说，但以上研究的矛盾之处也可能是研究环境设置的不同导致。Gajewski 等(2014a, b)的实验在室内进行，各表面在视野中均有呈现 (Gajewski, Wallin, & Philbeck, 2014a; Gajewski, Wallin, & Philbeck, 2014b)，而 He 等(2004)的研究则在长走廊或室外空旷环境中进行(He et al., 2004)，在这种更加空旷的环境中，其他表面的参照作用可能并非如此明显。已有研究表明，被试在室外空间中的朝向和距离判断成绩都高于经典的室内同类实验的水平(周佳树，张侃, 2006)。另外, Gajewski 等(2014a)的研究中为了保证目标前大约 3° 的地面可见，遮挡物的高度设置为可以调节的支架(宽度有限)。这很有可能造成遮挡物的宽度无法起到遮挡作用，即在实验中被试能够绕过遮挡物在其周围形成完整的地面表征进而对目标物进行知觉。

3.3 对心理机制关注不足

以往空间定位的相关研究已经说明了心理机制的重要性。空间记忆的内在参照系理论认为，观察者首先会从所处环境中选定一些线索或者物体作为参照物，并依据参照物与自身的位置关系构建一个“认知上的北方”，从而建立内在参照系，对处于其中的物体进行表征(周荣刚，张侃, 2004)。值得注意的是，后续研究发现个体经验、观察视点、物体朝向和场景结构会影响空间参照系统的最终确立或更新(李晶，张侃, 2011)。例如，前注意和后注意控制过程分别采取基于环境中心和自我中心的参照框架(李英武，于宙，韩笑, 2015)，认知老化导致的空间记忆下降也会导致空间导航和路径习得能力的损伤(张爱珍，王垚，李晶, 2019; 张家鑫，海拉干，李会杰, 2019)。整体型、路线型和界标型认知风格个体的空间能力逐渐降低(左婷婷，胡清芬, 2015)。由此可见，注意、记忆和认知风格等心理机制在空间定位中扮演着重要的角色。

与空间定位的研究相比, SSIP 假说对地面参照框架表征过程中的心理机制关注不足。大地理论说明了地面参照框架的重要性, SSIP 假说在此基础上提出，人类首先利用近处的深度

线索形成近处地面的表征，随后以此为锚点或模板，通过连续的纹理梯度信息逐步把远处的地面整合进来，最终形成一个远方向上翘起的地面参照框架。然而该假说仅从宏观的角度阐释了地面参照框架表征的主要过程和原则，并未进一步言明感觉记忆、工作记忆、双眼深度知觉等心理机制(过程)是如何参与其中的。这一局限不仅让 SSIP 假说显得过于宏观，还让这一理论的生态效度变差，甚至使其难以解释某些特殊情境(如应激状态)下的地面表征过程。地面参照框架的形成机制是依赖于感觉记忆还是工作记忆？近处地面和远处地面对双眼深度知觉的依赖强度是否不同？注意效率、情绪状态、乃至认知风格类型是否会影响地面表征过程？这些问题需要进一步的研究来解答。

4 小结与展望

总的来说，地面在人类日常生活中的重要性不言而喻，地面参照框架的形成机制也已成为空间知觉中的重要科学问题。SSIP 假说率先对这一形成过程做出推测，认为在中等距离范围内的空间知觉中，人类首先利用近处的深度线索形成近地面表征，随后以此为锚点或模板，通过连续的纹理梯度信息逐步把更远处的地面整合进来。这一假说包含三个具点：第一，地面参照框架是以近地面为模板，按照由近及远的顺序把远地面整合进来；第二，当相邻地面间具有良好的纹理梯度连续性，这种整合才能顺利进行；第三，个体最终整合出的地面参照框架是一个远方向上翘起的表面。虽然得到了大量证据的支持，但是 SSIP 假说的支持性证据存在方法学上的不足，难以直接检验地面参照框架的形成过程，且有部分研究结果与 SSIP 假说的观点并不一致，故其正确性还有待进一步检验。另外，目前 SSIP 假说对心理机制关注不足，不仅使其显得宏观，还让这一理论的生态效度变差，或难以解释某些特殊情境下的地面表征过程。

未来研究需要针对原有证据存在的方法学不足，利用可直接观测知觉过程的技术手段(如便携式眼动追踪、脑电监测和近红外光谱脑成像技术)，检验 SSIP 假说的观点，深入探究和揭示地面参照框架的形成机制。在应用方面，SSIP 假说对汽车、飞机和轮船等驾驶安全有重要意义。例如，在飞机(尤其是舰载机)进场和着陆阶段，即便在自动防撞地系统的协助下，驾驶员仍需精确表征地面并快速更新，人为差错将会造成可控飞行撞地事故的发生(白向丽，印刷中)。对 SSIP 假说和地面参照框架形成机制的探索有助于进一步理解飞行员知觉其所在地域的内部机制和改善途径，或将有助于飞行员的甄选培训以及自动防撞系统的设计，对国防产生积极影响。

参考文献

白向丽. (印刷中). 现代战斗机自动防撞地系统发展与应用研究. *飞行力学.*

焦军. (2011). *空间距离知觉中地表表征的 SSIP 假说——来自空间地表遮挡的证据*(硕士学位论文). 西南大学, 重庆.

李晶, 张侃. (2011). 空间记忆的内在参照系理论及研究进展. *华东师范大学学报(教育科学版), 29*(03), 49–54.

李英武, 于宙, 韩笑. (2015). 空间参照框架的产生机制及与认知机能的关系. *心理科学进展, 23*(02), 192–201.

张爱珍, 王垚, 李晶. (2019). 路径知识习得的认知老化效应. *心理科学进展, 27*(02), 242–250.

张家鑫, 海拉干, 李会杰. (2019). 空间导航的测量及其在认知老化中的应用. *心理科学进展, 27*(12), 2019–2033.

周佳树, 张侃. (2006). 动觉信息和无关运动对人的路径整合能力的影响. *人类工效学, 12*(03), 13–16.

周柳. (2015). *基于固有偏差的视觉距离知觉研究*(博士学位论文). 华东师范大学, 上海.

周佩灵, 黎安娟. (2011). 距离知觉中的 SSIP 理论. *科教导刊,* (04), 242–243.

周荣刚, 张侃. (2004). 空间知识记忆和提取的理论模型. *心理科学进展, 12*(03), 330–339.

周荣刚, 张侃. (2008). 基于场景记忆的参照系整合过程中的物体方位判断. *心理学报, 40*(12), 1229–1239.

左婷婷, 胡清芬. (2015). 空间认知风格及其与空间能力的关系. *心理科学进展, 23*(06), 959–966.

Baldwin, J., Burleigh, A., Pepperell, R., & Ruta, N. (2016). The perceived size and shape of objects in peripheral vision. *i-Perception, 7*(4), 1–23.

Bian, Z., Braunstein, M. L., & Andersen, G. J. (2005). The ground dominance effect in the perception of 3-D layout. *Perception and Psychophysics, 67*(5), 802–815.

Bian, Z., Braunstein, M. L., & Andersen, G. J. (2006). The ground dominance effect in the perception of relative distance in 3-D scenes is mainly due to characteristics of the ground surface. *Perception & Psychophysics, 68*(8), 1297–1309.

Bian, Z., & Andersen, G. J. (2010). The advantage of a ground surface in the representation of visual scenes. *Journal of Vision, 10*(8), 1–36.

Bian, Z., & Andersen, G. J. (2011). Environmental surfaces and the compression of perceived visual space. *Journal of Vision,11*(7):4, 1–22.

Blake, R., & Sekuler, R. (2006). Seeing a three-dimensional world. In R. Blake & R. Sekuler (Eds.), *Perception*

(5th) (pp. 273–315). New York, USA: McGraw-Hill Higher Education.

Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A., & Thompson, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual indoor environments. *Perception, 34*(2), 191–204.

Eby, David W., Loomis, Jack M. (1987). A study of visually directed throwing in the presence of multiple distance cues. *Perception & Psychophysics, 41*(4), 308–312.

Eckart, Z., & Markus, L. (2016). Visual space constructed by saccade motor maps. *Frontiers in Human Neuroscience, 10*,1–11.

Erkelens, & Casper, J. (2015). The extent of visual space inferred from perspective angles. *i-Perception, 6*(1), 5–14.

Feria, C. S., Braunstein, M. L., & Andersen, G. J. (2003). Judging distance across texture discontinuities. *Perception, 32*(12), 1423–1440.

Gajewski, D. A., Wallin, C. P., & Philbeck, J. W. (2014a). Gaze behavior and the perception of egocentric distance. *Journal of Vision, 14*(1):20, 1–19.

Gajewski, D. A., Wallin, C. P., & Philbeck, J. W. (2014b). Gaze direction and the extraction of egocentric distance. *Attention, Perception, & Psychophysics, 76*(6), 1739–1751.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Cambridge, USA: The Riverside Press.

Hajnal, A., Bunch, D. A., & Kelty-Stephen, D. G. (2014). Going for distance and going for speed: Effort and optical variables shape information for distance perception from observation to response. *Attention, Perception, & Psychophysics, 76*(4), 1015–1035.

He, Z. J., & Ooi, T. L. (2000). Perceiving binocular depth with reference to a common surface. *Perception, 29*(11), 1313–1334.

He, Z. J., Wu, B., Ooi, T. L., Yarbrough, G., & Wu, J. (2004). Judging egocentric distance on the ground: Oclusion and surface integration. *Perception, 33*(7), 789–806.

Hecht, H., Ramdohr, M., & Von Castell, C. (2018). Underestimation of large distances in active and passive locomotion. *Experimental Brain Research, 236(6)*, 1603–1609.

Higashiyama, A., & Yamazaki, T. (2015). Anisotropic perception of slant from texture gradient: Size contrast hypothesis. *Attention Perception & Psychophysics, 78*(2), 1–16.

Jansen, S. E. M., Toet, A., & Werkhoven, P. J. (2011). Human locomotion through a multiple obstacle environment: Strategy changes as a result of visual field limitation. *Experimental Brain Research, 212*(3), 449–456.

Jenkins, M. P., Gross, G. A., Bisantz, A. M., & Nagi, R. (2015). Towards context aware data fusion: Modeling and integration of situationally qualified human observations to manage uncertainty in a hard + soft fusion process. *Information Fusion,21*, 130–144.

Kavšek, M., & Granrud, C. E. (2013). The ground is dominant in infants' perception of relative distance. *Attention, Perception, & Psychophysics, 75*(2), 341–348.

Kunz, B. R., Wouters, L., Smith, D., Thompson, W. B., & Creem-Regehr, S. H. (2009). Revisiting the effect of quality of graphics on distance judgments in virtual environments: A comparison of verbal reports and blind walking. *Attention, Perception, & Psychophysics, 71*(6), 1284–1293.

Loomis, J. M., José A. Da Silva, & Fukusima, P. S. S. (1996). Visual perception of location and distance. *Current Directions in Psychological Science, 5*(3), 72–77.

Loomis, J. M. (2014). Three theories for reconciling the linearity of egocentric distance perception with distortion of shape on the ground plane. *Psychology & Neuroscience, 7*(3), 245–251.

Loyola, & Mauricio. (2018). The influence of the availability of visual cues on the accurate perception of spatial dimensions in architectural virtual environments. *Virtual Reality, 22*(3), 235–243.

Murphy, A. P., Ban, H., & Welchman, A. E. (2013). Integration of texture and disparity cues to surface slant in dorsal visual cortex. *Journal of Neurophysiology, 110*(1), 190–203.

Nakashima, R., & Kumada, T. (2017). Peripersonal versus extrapersonal visual scene information for egocentric direction and position perception. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 71*(5), 1–28.

Norman, J. F., Adkins, O. C. , Norman, H. F., Cox, A. G., & Rogers, C. E. (2015). Aging and the visual perception of exocentric distance. *Vision Research, 109*, 52–58.

Ooi, T. L., Wu, B., & He, Z. J. (2001). Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature, 414*(6860), 197–200.

Ooi, T. L., & He, Z. J. (2006). Elucidating the ground-based mechanisms underlying space perception in the intermediate distance range. *Cognitive Processing*, *7*(1 Supplement), 75–76.

Ooi, T. L., Wu, B., & He, Z. J. (2006). Perceptual space in the dark affected by the intrinsic bias of the visual system. *Perception, 35*(5), 605–624.

Ooi, T. L., & He, Z. J. (2007). A distance judgment function based on space perception mechanisms: Revisiting Gilinsky's (1951) equation. *Psychological Review, 114*(2), 441–454.

Ooi, T. L., & He, Z. J. (2015). Space perception of strabismic observers in the real world environment. *Investigative Ophthalmology & Visual Science, 56*(3), 1761–1768.

Philbeck, J. W., & Loomis, J. M. (1997). Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 23*(1), 72–85.

Philbeck, J. W., Gajewski, D. A., Sandra Mihelič Jaidzeka, & Wallin, C. P. (2017). The role of top-down knowledge about environmental context in egocentric distance judgments. *Attention Perception & Psychophysics, 80*(1), 1–14.

Proffitt, D. R. (2006). Distance perception. *Current Directions in Psychological Science, 15*(3), 131–135.

Proulx, M. J., Todorov, O. S. , Amanda, T. A. , & De, S. A. A. (2016). Corrigendum: Where am I? who am I? The relation between spatial cognition, social cognition, and individual differences in the built environment. *Frontiers in Psychology, 7*,1–23.

Sedgwick, H. A. (2005). Visual Space Perception. In E. B. Goldstein (Ed.), *Blackwell Handbook of Sensation and Perception* (pp. 128–167). Malden, USA: Blackwell Publishing.

Šikl Radovan, Šimeček Michal. (2015). Visual space perception at different levels of depth description. *Attention, Perception, & Psychophysics, 77*(6), 2098–2107.

Sinai, M. J., Ooi, T. L., & He, Z. J. (1998). Terrain influences the accurate judgement of distance. *Nature, 395*(6701), 497–500.

Teng, D. W., & Charles L. Eddy. (2016). Non-visually-guided distance perception depends on matching torso fluctuations between training and test. *Attention, Perception, & Psychophysics, 78*(8), 2320–2328.

Thompson, W. B., Dilda, V., & Creem-Regehr, S. H. (2007). Absolute distance perception to locations off the ground plane. *Perception, 36*(11), 1559–1571.

Thomson, J. A. (1983). Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 9*(3), 427–443.

Wu, B., Ooi, T. L., & He, Z. J. (2004). Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature, 428*(6978), 73–77.

Wu, B., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2007). Inaccurate representation of the ground surface beyond a texture boundary. *Perception,36*(5), 703–721.

Wu, J., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2008). Perceived relative distance on the ground affected by the selection of depth information. *Perception & Psychophysics, 70*(4), 707–713.

Wu, J., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2014). The visual system's intrinsic bias influences space perception in the impoverished environment. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance, 40*(2),

626–638.

Wu, J., Zhou, L., Shi, P., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2015). The visible ground surface as a reference frame for scaling binocular depth of a target in midair. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 41*(1), 111–126.

Yang, Z., & Purves, D. (2003). A statistical explanation of visual space. *Nature Neuroscience, 6*(6), 632–640.

Zhou, L., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2013). The visual system's intrinsic bias and knowledge of size mediate perceived size and location in the dark. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 39*(6), 1930–1942.

Zhou, L., Ooi, T. L., & He, Z. J. (2016). Intrinsic spatial knowledge about terrestrial ecology favors the tall for judging distance. *Science Advances, 2*(8), e1501070.

Zhou, L., Deng, C., Ooi, T. L., & He, Z. J. (2016). Attention modulates perception of visual space. *Nature Human Behaviour, 1*(1), 0004.

Sequential surface integration process hypothesis of the ground-surface reference frame

DONG Bo[1], WANG Chengyu[2], ZHANG Xiuling[2], ZHANG Tianyang[3]

([1] Department of Psychology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

([2]School of Psychology, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

([3]School of Public Health, Medical College, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: The ground-surface reference frame is important in space perception. The sequential surface integration process (SSIP) hypothesis firstly speculated on its formation process. The core viewpoints and relevant evidences of SSIP hypothesis include three aspects: the representation principle of the ground, the integration conditions and the representation results. Although it has been supported by a large number of studies, the existing supporting evidence of SSIP hypothesis still has insufficient methodology, little attention to psychological mechanism, and some opposing evidence, which makes it unable to completely clarify the representation process of ground reference framework. Future research needs to be combined with technology based on process inspection and explore the formation mechanism of ground reference framework directly, and consider its application in national defense.

Key words: the ground-surface reference frame; ground representation; SSIP hypothesis; space perception